

爆炸塔内 120kgTNT 当量爆炸载荷的数值分析

张亚军 胡八一 谷岩

(中国工程物理研究院流体物理研究所 621900 绵阳)

摘要: 爆炸塔设计中常采用等当量集中装药估算爆炸塔内部载荷。为研究该方法的合理性, 本文采用有限体积方法离散求解积分型 Euler 方程组; 利用瞬时爆轰模型描述炸药爆炸初场, 分别计算了乳化炸药和 TNT 集中装药爆炸对爆炸塔的内部加载情况; 给出了塔体及封头内壁面 9 个特征点的压力时间曲线。结果表明: 可以采用集中装药模拟乳化炸药对爆心截面处的超压作用, 但不可以采用集中装药模拟乳化炸药对封头中心处的超压作用。因为在封头中心处乳化炸药爆炸会产生的超压极值约为 TNT 集中装药的 2 倍; 塔体柱段的爆心截面处与封头中心处为超压作用最强的部位, 两处冲量大致相当; 压力最大值出现在封头中心处, 由反射冲击波会聚产生。建议塔体建筑设计时对封头中心处和塔体爆心截面处采取相应的防护措施。

关键词: 爆炸塔; 标准椭球封头; 爆炸载荷; 超压; 数值分析

中图分类号: O383+.2 **文献标识码:** A

1 引 言

随着人们对环境保护的日益重视以及爆炸加工技术的发展, 以往人们在户外场地进行的各种爆炸作业不断改在抗爆设施内完成。这已逐渐成为各国不得不遵守的准则, 尤其是爆炸作业当量超过一定数量之后^[1-2]。爆炸塔的应用, 不但大幅降低了大当量爆炸的危险性, 而且减小了环境污染, 显著提高了工业生产能力。因此, 国内外爆炸加工方面的生产作业, 例如爆炸加工金刚石、爆炸成型等均趋于在爆炸塔内进行。

国外方面大当量的爆炸塔较多, 仅美国就有几十个用钢筋混凝土建造的爆炸塔, 其工作当量为几十克到 15kgTNT。1985 年美国海军表面武器中心^[3]建造了 22.5kgTNT 当量的试验用爆炸塔, 其内部尺

寸为 6m×6m×4.8m, 壁厚为 2.1m。1996 年第 27 届世界爆炸物品安全研讨会上, Krauthammer^[4]介绍了美国陆军试验站用的矩形爆炸塔。其内部尺寸为 14m×9.5m×6m, 壁厚为 1.4m, 抗爆当量可达 136 kg TNT。国内方面, 中科院力学所^[5]在上世纪 70 年代末建造了 1kg TNT 当量的爆炸塔, 其内径为 9.2m, 壁厚为 1.8m, 其中柱段高 2.8m, 为球形封头。上世纪 80 年代中期中国工程物理研究院流体物理研究所设计建造了 5kgTNT 当量的圆柱形爆炸塔。其内径为 8m, 壁厚 0.8m, 柱段高 4m, 球形封头, 该爆炸塔至今仍在使用。以上爆炸塔的设计方法大多是结构动力学中的动力系数法, 即通过爆炸载荷的计算给出作用于塔体内壁的反射超压峰值和作用时间; 再计算出塔体的振动周期, 进而给出动载荷的等效静载荷; 根据等效静载荷计算塔体壁厚条件下各强度组元的实际尺寸和分布, 完成建筑的强度设计。

设计爆炸塔时首先要估算爆炸载荷,通常是采用 TNT 集中装药进行载荷估算。本文研究了具体装药和集中装药对塔体加载方式的差别,以判断采用集中装药评估方法的合理性。采用有限体积方法求解积分型 Euler 方程组;分别计算了 150kg 乳化炸药(其 TNT 当量为 120kg)和 120kg TNT 集中装药两种情况的爆炸场,得到了塔体内壁 9 个特征位置的压力时间曲线并分析得到了两者的相同点和差别。结论可为爆炸塔的工程设计提供参考。

2 计算模型

2.1 物理建模与控制方程

由于爆炸塔内部空间的尺度较大,数值模拟爆炸场时不便于计算炸药的点火和起爆过程。本文根据经验采用瞬时爆轰模型给出爆炸初场,将爆源简化为理想气体组成的高压气团,即采用理想气体状态方程描述爆轰产物气体。同时将空气也作为理想气体,状态方程为

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (1)$$

其中 p 、 ρ 、 e 、 γ 分别为压力、密度、比内能、比热比。

高压气体的初始状态为

$$p = 0.43p_{CJ}, \quad \rho = \rho_0, \quad \mathbf{u} = \mathbf{0}, \quad \gamma = 1.4$$

其中 p_{CJ} 、 ρ_0 分别为 C-J 爆轰压力、装药密度。

空气的初始状态为

$$p = 0.1 \text{MPa}, \quad \rho = 1.29 \text{kg/m}^3, \quad \mathbf{u} = \mathbf{0}, \quad \gamma = 1.4。$$

一般采用 Navier-Stokes 方程描述流场变化。根据雷诺数定义 $Re = UL/\nu$, 可知高压气体介质膨胀过程中的雷诺数约为 10^4 量级。因此忽略粘性项, 可将 Navier-Stokes 方程简化为 Euler 方程, 求解 Euler 方程即得到不同时刻的爆炸流场。

三维 Euler 方程为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial z} = \mathbf{0} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E}(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ u(\rho E + p) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ v(\rho E + p) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G}(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \\ w(\rho E + p) \end{pmatrix}$$

其中: $E = e + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$; u 、 v 、 w 分别表示速度沿坐标轴 x 、 y 、 z 方向的分量。式(2)通过空间积分并在空间上平均, 可得

$$\frac{1}{V} \int_V \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} dV + \frac{1}{V} \left(\int_{\partial V} \mathbf{E}(\mathbf{U}) dS + \int_{\partial V} \mathbf{F}(\mathbf{U}) dS + \int_{\partial V} \mathbf{G}(\mathbf{U}) dS \right) = \mathbf{0} \quad (3)$$

定义体积平均量 $\bar{\mathbf{U}} = \frac{1}{V} \int_V \mathbf{U} dV$, 则可将方程(3)写为

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{U}}}{\partial t} + \frac{1}{V} \oint_{\partial V} (\mathbf{E}(\mathbf{U}) n_x + \mathbf{F}(\mathbf{U}) n_y + \mathbf{G}(\mathbf{U}) n_z) dS = \mathbf{0} \quad (4)$$

方程(4)即为本文采用的积分型 Euler 方程组。对于轴对称问题, 方程(4)可描述为

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{U}}}{\partial t} + \frac{1}{V} \oint_{\partial V} (\mathbf{E}(\mathbf{U}) n_x + \mathbf{G}(\mathbf{U}) n_y) dS = -\frac{1}{xV} \int_V \mathbf{E}(\mathbf{U}) dV \quad (5)$$

方程(5)的求解采用有限体积方法进行空间离散。其中物理量定义在网格中心处, 而通量采用 PPM 格式构造, 即

$$\mathbf{E}(\mathbf{U}) \cong \mathbf{E}(\bar{\mathbf{U}}) = \mathbf{E}^{PPM}(\bar{\mathbf{U}}) \quad (6)$$

PPM 格式由 Collela Phillips 于 1984 年提出, 详细格式请参见文献[6]。

对于固壁边界条件, 采用边界提法, 如式(7)所示。其中下标 r 表示刚性壁面边界条件。

$$q|_b = q|_r \quad (q = p, \rho) \quad u|_r = 0 \quad (7)$$

计算中的对称轴处采用对称边界条件, 即

$$q|_b = q|_r \quad (q = p, \rho) \quad u|_b = -u|_r \quad (8)$$

2.2 计算模型及说明

本文研究的爆炸塔内径为 12m, 柱段高 5m, 顶盖为标准椭球封头。沿塔体内壁面设置 9 个特征点分别记录压力时间曲线: 其中 *A*、*B*、*C* 三点位置沿轴向分别与炸药的下底、中心、上顶等高; *D*、*E* 两点的 *y* 坐标分别为 4m、5m; *F*、*G*、*I* 点的 *x* 坐标分别为 4m、2m、0; *H* 点的 *x* 坐标与炸药的轴向半径相等, 如图 1 所示。其中图 1(a) 为乳化炸药; 图 1(b) 为 TNT 集中装药的计算模型。乳化炸药总质量为 150kg, 爆炸装置为同轴空心圆柱形。其内、外径分别为 135mm、410mm, 高为 1300mm; 密度取 1.15g/cm^3 , 爆速取 3.2km/s , 爆压取 11GPa 。作为对比的 TNT 炸药总质量取为 120kg, 爆炸装置采用柱型实心装药, 直径为 410mm, 高为 528mm; 密度为 1.64g/cm^3 , 爆压取 19GPa 。

计算网格采用相同的结构网格, 网格数为 251×301 。

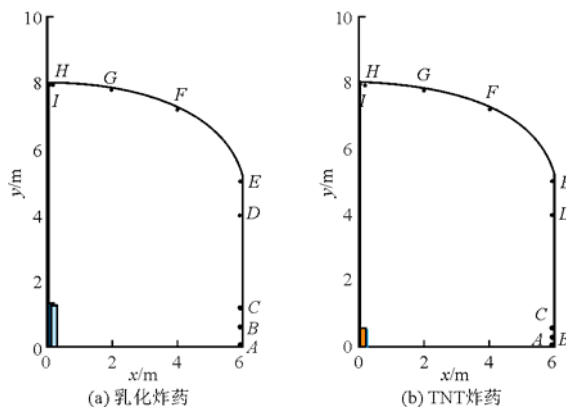


图 1 塔体及炸药的计算模型

3 计算结果与分析

图 2(a) 给出了采用乳化炸药模型计算得到 9 个特征点的压力时间曲线。图 2(b)、图 2(c)、图 2(d) 分别放大显示了图 2(a) 中的 *A*~*C* 点、*D*~*F* 点、*G*~*I* 点。

图 2(b) 中, 由于塔底刚性壁面的存在, 爆炸首先在下底形成类似柱面冲击波。冲击波到达柱段内壁面 *A* 点后, 反射压力达到 11.81MPa , 略高于 *B* 点处冲击波在壁面反射的压力 11.66MPa 。与炸药顶部平齐的 *C* 点峰值压力为 8.73MPa , 明显小于 *A*、*B* 两点的反射压力值。另外, 由于柱段反射的冲击波在下底面径向膨胀的高密度气体界面处发生透射反射, *A*、*B*、*C* 三点在 4ms 附近出现第二个波峰。可见塔体下底内壁与爆心 (*B* 点) 截面处的超压峰

值大致相当, 冲击波宽度也基本一致。

图 2(c) 显示随着冲击波的反射点沿塔体内壁面向上移动, *D*、*E* 点的最大超压峰值迅速减小, 分别为 1.30MPa 和 1.08MPa 。由于第一道冲击波在封头反射后压力升高, 沿封头向其中心会聚的冲击波波后压力也相应升高。*F* 点处第一道冲击波反射压力峰值出现在 7.8ms 附近, 峰值为 0.87MPa ; 之后, 由裙部 (*E* 点) 处产生向封头中心会聚的反射冲击波在 9ms 时到达, 其波后压力可达到 1.57MPa 。

从图 2(d) 中可看出爆炸产生的第一道冲击波约于 7.3ms 到达 *G* 点并反射, 反射后峰值压力小于 1MPa 。它由爆炸塔柱段反射冲击波会聚于爆炸塔中心轴线后, 同时形成径向向外传播的类似柱面冲击波和向封头传播的类似球面冲击波。该类似球面冲击波在 11.36ms 左右到达 *I* 点和 *H* 点, 并反射形成第二道反射冲击波, 第二道反射冲击波的反射点由封头中心向外移动, 于 11.57ms 到达 *G* 点。稍后的 12.34ms 时圆柱裙部壁面反射形成的马赫杆向封头中心会聚经过 *G* 点, 压力达到 5.91MPa 。同为封头中心区的 *H* 点和 *I* 点的间距与炸药的装药半径相同, 第一道冲击波均在 6.6ms 左右到达, 第二道冲击波在 11.3ms 时到达。但封头裙部壁面反射形成的马赫波, 向封头中心会聚形成的第三道冲击波, 在 13.3ms 时到达 *H* 点, 压力峰值达到 13.98MPa , 在 13.4ms 时到达 *I* 点, 压力峰值达到 47.96MPa , 使 *I* 点成为爆炸塔封头内壁的压力极值点。之后, 随着会聚冲击波的散心膨胀, 13.6ms 以后封头中心区的压力迅速下降到 4MPa 以下。

图 2 表明塔体壁面反射超压较大的位置在 *A*、*B*、*C* 三点和 *H*、*I* 两点, 即塔体爆心截面与封头的中心区。塔体爆心截面主要由底面反射形成的马赫波在爆心截面正反射, 超压约为 11.8MPa , 作用时间约为 1ms ; 而封头中心处在第一道冲击波反射后, 先后又经过圆柱段反射会聚于轴心形成的类球面冲击波 (第二道冲击波) 反射, 以及向封头中心会聚的第三道冲击波。经过三次压缩, 使得在封头中心处出现超压峰值的最大值 47.96MPa , 以三角波近似得到作用时间约为 0.5ms 。在封头中心附近区域压力峰值达到 13.98MPa , 以三角波近似得到作用时间约为 0.8ms 。可见塔体的爆心截面超压作用时间略大于封头中心处, 其冲量大致相当, 因此这两个部位都需要加强防护。

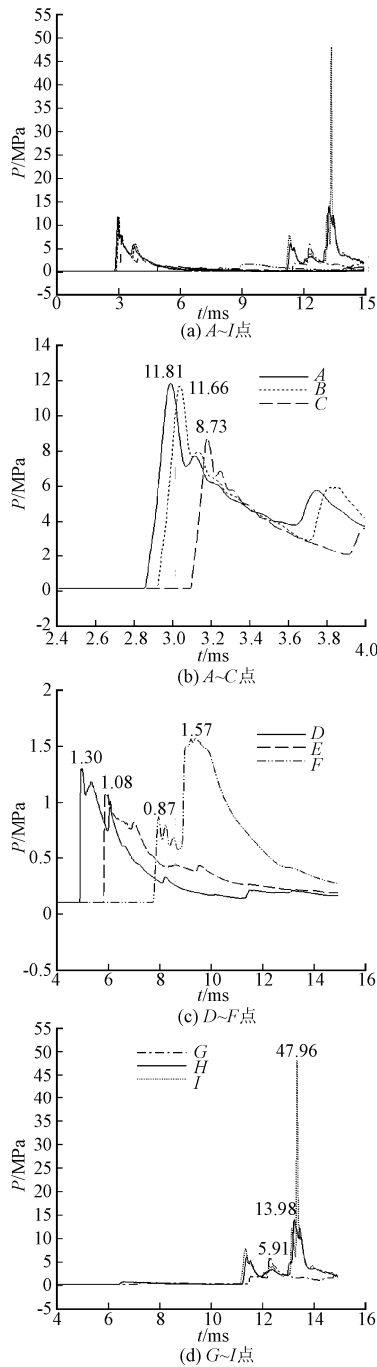


图2 乳化炸药模型的特征点压力曲线

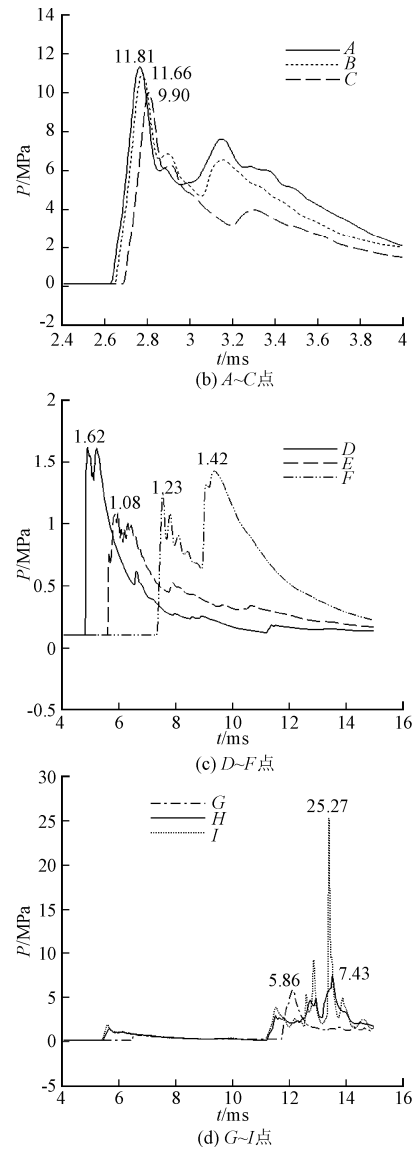
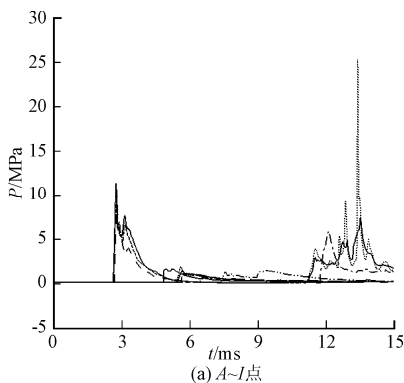


图3 TNT炸药模型的特征点压力曲线

作为对比,图3给出了120千克TNT集中装药在相同爆心位置处爆炸过程中塔体内壁面9个特征位置的压力时间曲线。从图3(b)可以看出:TNT集中装药情况下,A、B两点的压力峰值与图2(b)中相当(分别为11.81MPa和11.66MPa)。由于集中装药时炸药的体积相对较小,C点的第一个压力峰值为9.90 MPa,小于A、B两点,略大于图2(b)中C点的反射压力值8.73MPa。D、E、F、G点的压力曲线都分别与图2(c)、图2(d)中大致相当。但H和I点冲击波会聚后的压力峰值则明显偏小,分别为7.43MPa和25.27MPa,约为图2(d)中相同特征点压力峰值的一半。

对于特征点A~F来讲,TNT集中装药与乳化炸药模型相比第一道冲击波到达时间要早约0.2ms。

综上所述,对于TNT当量为120kg的乳化炸药,

塔体爆心截面处的反射超压峰值与 TNT 集中装药相当;但在封头中心,乳化炸药爆炸产生的超压峰值约为 TNT 装药的 2 倍。

4 结 论

本文分别计算了爆炸塔内 120kgTNT 当量乳化炸药与 TNT 炸药的爆炸场,通过比较沿塔内壁 9 个特征点的压力时间曲线,得出以下结论。

1) 等当量的乳化炸药与 TNT 集中装药爆炸,在塔体下底和爆心轴面之间区域内超压峰值大致相当。比较反射冲击波峰值在塔体爆心截面处的出现时间,乳化炸药略晚于 TNT 集中装药。评估乳化炸药在爆心截面处的超压,采用等当量 TNT 集中装药计算是可行的。

2) 在封头中心处,乳化炸药爆炸会出现两道冲击波反射和一道反射冲击波的会聚,最后会聚冲击波产生的超压峰值可达 47.96MPa,接近 TNT 集中装药的 2 倍。因此采用等当量 TNT 集中装药评估乳化炸药时,封头中心处的压力载荷被严重低估,是不

适合的。

3) 虽然塔体柱段爆心截面的超压峰值小于封头中心处,但是爆心截面超压的作用时间要长于封头中心处,且两者冲量大致相当,因此这两处都需要采取相应的防护措施。

参 考 文 献

- [1] 赵士达. 爆炸容器[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9 (1): 86-96.
- [2] 胡八一. 爆炸容器研究及应用最新进展评述[M]. 北京: 化工出版社, 2009.
- [3] Swisdak M. Validation tests in building 327-50 pound bomb proof, NSWC-TR-384 [R]. [S.l.]: Naval Surface Weapons Center Silver Spring MD, 1985.
- [4] Krauthammer T. Reinforcement details for structural concrete blast containment facilities, AD-M000767 [R]. [S.l.], 1997.
- [5] 李国豪. 爆炸洞设计中的力学问题, GF06901 [R]. 1977.
- [6] Colella P, Woodward P. The piecewise parabolic method (PPM) for gasdynamical simulation[J]. Journal of Computational Physics, 1984, (54): 174-201.